

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 29–46
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.002>
UDC 656.2

MODELING AND PROVISIONING OF QUALITY OF SERVICE (QOS) IN WIMAX NETWORKS BASED ON IEEE 802.16 STANDARD

I. Kosyakov^{1}, T. Torekeliev¹, Muhindi Mozeh²*

¹International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

²Government Yangtze University of Engineering & Technology, Hubei, China.

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz

Igor Kosyakov — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1914-8530>;

Temirlan Torekeliev — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: torekeliev.temirlan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-6091-969X>;

Muhindi Mozeh — Senior Lecturer, Government Yangtze University of Engineering & Technology, Hubei, China

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© I. Kosyakov, T. Torekeliev, Muhindi Mozeh

Abstract. This study is devoted to the analysis of architecture and mechanisms for Quality of Service (QoS) in wireless networks of the WiMAX standard (IEEE 802.16). The topic is relevant due to the growing demand for high-speed wireless networks supporting multi-user applications with different requirements for data transmission rate and latency. The main objective of the work is to analyze QoS functionality in WiMAX networks and to develop models for evaluating the efficiency of the QoS scheduler in radio channel resource allocation. The research objectives include: studying the structure of WiMAX networks and service classes, developing simulation models using OPNET Modeler 14.0 and eXtended Network Simulator (XNS), configuring service flow parameters, and conducting tests with different types of traffic (UGS, RT-VR, NRT-VR, BE, ERT-VR). The results demonstrated that the QoS scheduler ensures stable operation of latency-sensitive applications (UGS and ERT-VR), while less critical service flows show increased delays and packet losses under higher load. Simulations confirmed the ability to flexibly allocate bandwidth and prioritize service flows in real time. In conclusion, the developed models and methods allow not only the assessment of QoS performance in WiMAX networks but also their application for optimizing real network infrastructures, testing new resource allocation algorithms, and training specialists in wireless technologies. The study opens prospects for further research related to integration with LTE and 5G networks and improving service quality under high user mobility.

Keywords: WiMAX, QoS, wireless network, scheduler, simulation modeling, service flows

For citation: I. Kosyakov, T. Torekeliev, Muhindi Mozeh. Modeling and Provisioning of Quality of Service (QoS) in WiMAX Networks Based on IEEE 802.16 Standard // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 29–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.002>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



IEEE 802.16 СТАНДАРТЫ НЕГІЗІНДЕ WiMAX ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ САПАСЫН (QoS) МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ

И.О. Косяков^{1}, Т.К. Төрелдиев¹, Мухинди Мозе²*

¹Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай.

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz

Игорь Косяков — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1914-8530>;

Темірлан Төрелдиев — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: torekeliiev.temirlan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-6091-969X>;

Мухинди Мозе — аға оқытушы, Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© И.О. Косяков, Т.К. Төрелдиев, Мухинди Мозе

Аннотация. Бұл зерттеу WiMAX стандарты (IEEE 802.16) бойынша сымсыз желілерде қызмет көрсету сапасын (QoS) қамтамасыз ету архитектурасы мен механизмдерін зерттеуге арналған. Тақырып өзекті, себебі деректерді беру жылдамдығы мен кідіріске әртүрлі талаптары бар көп қолданушы қосымшаларын қолдайтын жоғары жылдамдықты сымсыз желілерге сұраныс артып отыр. Жұмыстың негізгі мақсаты — WiMAX желілеріндегі QoS қызметін талдау және радио арна ресурстарын бөлу кезінде QoS жоспарлаушысының тиімділігін бағалау үшін модельдер әзірлеу. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: WiMAX желілерінің құрылымын және қызмет көрсету сыныптарын зерттеу, OPNET Modeler 14.0 және eXtended Network Simulator (XNS) арқылы имитациялық модельдер әзірлеу, қызмет ағындарының параметрлерін баптау, әртүрлі трафик түрлерімен (UGS, RT-VR, NRT-VR, BE, ERT-VR) тестілеу жүргізу. Зерттеу нәтижелері QoS жоспарлаушысы кідіріске сезімтал қосымшалардың (UGS және ERT-VR) тұрақты жұмысын қамтамасыз ететінін көрсетті, ал аз маңызды қызмет ағындары жүктеме артқанда кідіріс пен пакет жоғалтудың өсуін көрсетеді. Имитациялық модельдер арнаны икемді бөлу және қызмет ағындарын нақты уақыт режимінде басымдыққа қою мүмкіндігін растайды. Қорытындылай келе, әзірленген модельдер мен әдістер WiMAX желілеріндегі QoS тиімділігін бағалауға ғана емес, нақты желілік инфрақұрылымды оңтайландыруға, жаңа ресурстарды бөлу алгоритмдерін тестілеуге және сымсыз технологиялар бойынша мамандарды даярлауға мүмкіндік береді. Зерттеу LTE және 5G желілерімен интеграциялау және қолданушылардың жоғары мобильдігі жағдайында қызмет көрсету сапасын жақсарту перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: WiMAX, QoS, сымсыз желі, жоспарлаушы, имитациялық модельдеу, қызмет ағындары

Дәйексөздер үшін: И.О. Косяков, Т.К. Төрелдиев, Мухинди Мозе. IEEE 802.16 стандарты негізінде WiMAX желілерінде қызмет көрсету сапасын (QoS) модельдеу және қамтамасыз ету // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 29–46 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.002>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ (QOS) В СЕТЯХ WiMAX НА БАЗЕ СТАНДАРТА IEEE 802.16

И.О. Косяков^{1}, Т.К. Төрекелдиев¹, Мухинди Мозе²*

¹Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

²Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, провинция Хубэй, Китай.

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz

Игорь Косяков — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1914-8530>;

Темірлан Төрекелдиев — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: torekeliyev.temirlan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-6091-969X>;

Мухинди Мозе — старший преподаватель, Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, провинция Хубэй, Китай

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© И.О. Косяков, Т.К. Төрекелдиев, Мухинди Мозе

Аннотация. Данное исследование посвящено изучению архитектуры и механизмов обеспечения качества обслуживания (QoS) в беспроводных сетях стандарта WiMAX (IEEE 802.16). Тема актуальна в связи с ростом спроса на высокоскоростные беспроводные сети, поддерживающие многопользовательские приложения с различными требованиями к скорости передачи данных и задержкам. Основной целью работы является анализ функционирования QoS в сети WiMAX и разработка моделей для оценки эффективности планировщика QoS при распределении ресурсов радиоканала. Для достижения цели поставлены следующие задачи: изучение структуры сети WiMAX и классов обслуживания, разработка имитационных моделей с использованием OPNET Modeler 14.0 и eXtended Network Simulator (XNS), настройка параметров сервисных потоков и проведение тестирования с разными типами трафика (UGS, RT-VR, NRT-VR, BE, ERT-VR). Результаты исследования показали, что использование планировщика QoS обеспечивает стабильную работу приложений с критичными требованиями к задержке (UGS и ERT-VR), при этом менее критичные сервисные потоки демонстрируют рост задержек и потерь пакетов с увеличением нагрузки. Симуляции подтвердили возможность гибкого распределения полосы пропускания и приоритетизации сервисных потоков в реальном времени. В заключение отмечено, что разработанные модели и методы позволяют не только оценивать эффективность QoS в сетях WiMAX, но и применять их для оптимизации реальных сетевых инфраструктур, тестирования новых алгоритмов распределения ресурсов и подготовки специалистов по беспроводным технологиям. Работа открывает перспективы для дальнейших исследований, связанных с интеграцией с сетями LTE и 5G и повышением качества обслуживания в условиях высокой мобильности пользователей.

Ключевые слова: WiMAX, QoS, беспроводная сеть, планировщик, имитационное моделирование, сервисные потоки

Для цитирования: И.О. Косяков, Т.К. Төрекелдиев, Мухинди Мозе. Моделирование и обеспечение качества обслуживания (QoS) в сетях WiMAX на базе стандарта IEEE 802.16 // Помышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 29–46. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.002>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях стремительного роста объёмов передаваемой информации и увеличения числа пользователей беспроводных сетей особое значение приобретает обеспечение гарантированного качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Современные телекоммуникационные системы должны поддерживать широкий спектр приложений — от традиционной передачи данных до сервисов реального времени, таких как голосовая и видеосвязь, которые предъявляют жёсткие требования к задержке, джиттеру и потерям пакетов.

Технология WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), стандартизированная IEEE 802.16, изначально разрабатывалась как сеть операторского класса, предназначенная для предоставления широкополосного беспроводного доступа на больших расстояниях. В отличие от многих других беспроводных технологий, WiMAX на уровне стандарта предусматривает развитую инфраструктуру управления качеством обслуживания, основанную на сервисных потоках, механизмах приоритизации и планировании ресурсов радиоканала.

Несмотря на наличие теоретических моделей и описаний механизмов QoS в стандарте IEEE 802.16, вопросы практической реализации и оценки эффективности алгоритмов планирования ресурсов остаются недостаточно исследованными. Особенно это касается поведения различных классов обслуживания при изменении нагрузки, числа абонентов и параметров трафика. В связи с этим возникает необходимость имитационного моделирования сетей WiMAX, позволяющего исследовать процессы управления QoS в условиях, приближенных к реальным.

Актуальность данной работы определяется как теоретической, так и практической значимостью. С теоретической точки зрения исследование углубляет понимание механизмов QoS и работы планировщика на уровне MAC в сетях WiMAX. С практической точки зрения полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации беспроводных сетей операторского класса, а также при выборе параметров обслуживания для различных типов приложений.

Объект исследования — беспроводная сеть стандарта WiMAX (IEEE 802.16).

Предмет исследования — механизмы обеспечения качества обслуживания (QoS) и работа планировщика ресурсов радиоканала в сетях WiMAX.

Цель исследования — моделирование сети WiMAX и оценка параметров качества обслуживания различных классов трафика на основе имитационного моделирования с использованием программного продукта OPNET Modeler.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать архитектуру сети WiMAX и принципы обеспечения QoS в стандарте IEEE 802.16;
- рассмотреть классы обслуживания QoS и их характеристики;
- разработать имитационную модель сети WiMAX в среде OPNET Modeler;
- выполнить настройку параметров QoS для различных типов трафика;
- провести моделирование и анализ показателей пропускной способности, задержки, джиттера и потерь пакетов;
- оценить влияние приоритетов QoS на распределение ресурсов радиоканала.

В работе используются следующие методы исследования:

- анализ нормативных и научных источников по стандарту IEEE 802.16;
- имитационное моделирование сетевых процессов;
- сравнительный анализ показателей качества обслуживания;
- статистическая обработка результатов моделирования.

Основным подходом исследования является системный подход, позволяющий рассматривать сеть WiMAX как совокупность взаимосвязанных элементов и процессов управления QoS.

В качестве гипотезы исследования выдвигается предположение, что применение механизмов QoS, предусмотренных стандартом IEEE 802.16, обеспечивает приоритетное обслуживание трафика реального времени и позволяет поддерживать требуемые показатели качества обслуживания даже при росте нагрузки и числа абонентов.

Научная значимость работы заключается в обобщении и анализе механизмов QoS в сетях WiMAX и в оценке эффективности работы планировщика ресурсов на основе имитационного моделирования.

Практическая значимость состоит в возможности использования результатов исследования при проектировании и настройке беспроводных сетей WiMAX, а также при разработке и тестировании алгоритмов управления качеством обслуживания.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования послужили нормативные и научно-технические источники, посвящённые вопросам построения, развертывания и обеспечения качества обслуживания в беспроводных сетях широкополосного доступа стандарта IEEE 802.16 (WiMAX). В исследовании использованы:

- международные стандарты IEEE 802.16-2009, регламентирующие архитектуру, протоколы и параметры физического и канального уровней WiMAX;
- научные статьи из рецензируемых журналов (IEEE Communications Magazine, Computer Networks), содержащие результаты аналитических и экспериментальных исследований характеристик WiMAX-сетей;
- монографии зарубежных и отечественных авторов, посвящённые теории беспроводных сетей, методам обеспечения QoS и анализу производительности;
- электронные научные и учебные ресурсы, описывающие практические аспекты развертывания WiMAX и механизмы управления трафиком.

В количественном отношении материал исследования включает анализ параметров пропускной способности, задержки, джиттера и вероятности потерь пакетов, полученных из опубликованных экспериментальных данных и расчетных моделей. В качественном отношении исследование основано на сравнительном анализе архитектурных решений, протокольных механизмов и методов обеспечения QoS в WiMAX-сетях.

Используемые материалы являются репрезентативными и охватывают как теоретические основы, так и практические аспекты функционирования сетей WiMAX, что обеспечивает достоверность полученных выводов.

В рамках данной работы рассматриваются следующие исследовательские вопросы:

- Какие архитектурные и протокольные особенности стандарта IEEE 802.16 определяют возможности развертывания сетей WiMAX?
- Какие механизмы обеспечения качества обслуживания применяются в WiMAX-сетях?
- Как параметры QoS зависят от характеристик трафика и условий функционирования беспроводной сети?
- Насколько эффективны существующие методы управления ресурсами при различных сценариях нагрузки?

Гипотеза исследования

Предполагается, что использование встроенных в стандарт IEEE 802.16 механизмов управления ресурсами и классификации трафика позволяет обеспечить требуемый уровень качества обслуживания для различных типов сервисов (данные, голос, видео) при развертывании сетей WiMAX, даже в условиях ограниченной полосы пропускания и изменяющихся параметров радиоканала.

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов:

- Аналитический этап — анализ научной литературы и стандартов, посвящённых технологиям WiMAX и обеспечению QoS.

- Систематизация материалов — классификация архитектурных решений, типов сервисов и механизмов управления качеством обслуживания.

- Моделирование и расчетный этап — изучение зависимостей основных показателей QoS от параметров сети и характеристик трафика на основе аналитических моделей и опубликованных данных.

- Обобщающий этап — интерпретация полученных результатов, формулирование выводов и рекомендаций по развертыванию WiMAX-сетей.

В работе использованы следующие методы научного исследования:

- метод анализа и синтеза — для изучения архитектуры WiMAX-сетей и обобщения теоретических положений;

- сравнительный анализ — для сопоставления различных механизмов обеспечения QoS и подходов к развертыванию беспроводных сетей;

- структурно-функциональный метод — для анализа взаимодействия элементов WiMAX-системы;

- математическое и имитационное моделирование — для оценки показателей качества обслуживания;

- графоаналитический метод — для визуализации зависимостей между параметрами сети;

- обобщение и интерпретация результатов — для формулирования выводов и научных положений.

Новизна исследования заключается в комплексном анализе механизмов обеспечения QoS в сетях WiMAX с учётом особенностей развертывания и реальных условий эксплуатации, а также в систематизации современных подходов к управлению трафиком на основе стандартов IEEE 802.16 и результатов последних научных исследований.

Результаты и обсуждение

Стандарт IEEE 802.16 (IEEE, 2009: 54–59) описывает технологию WiMAX (англ. Worldwide Interoperability for Microwave Access). WiMAX – это телекоммуникационная технология предоставления широкополосной беспроводной связи на больших расстояниях для широкого спектра устройств: от рабочих станций и портативных компьютеров до мобильных телефонов.

В общем виде сеть WiMAX состоит из базовых и абонентских станций. При этом базовые станции выполняют также роль шлюзов сети Internet. Для обмена данными между станциями используется СВЧ-диапазон радиоволн от 1,5 до 11 ГГц. В идеальных условиях скорость обмена данными может достигать 70 Мбит/с, при этом не требуется обеспечения прямой видимости между передатчиком и приёмником (Andrews, 2007: 114–295).

К одной базовой станции (BS – base station) могут быть подключены сотни абонентских станций (SS – subscriber station), работающих в одном радиодиапазоне (канале). На каждой SS может быть запущено множество приложений, которым необходим доступ к среде передачи данных. У этих приложений могут быть совершенно разные требования к качеству связи (ширина полосы, задержка и т.д.). Например, приложениям VoIP (передача речи по сети) не требуется широкая пропускная способность канала, но большое значение имеет транзитная задержка доставки пакетов от отправителя к получателю. FTP-клиенту, в свою очередь, задержка не важна, но важна ширина полосы (Ahson, 2008: 223–441).

Так как все SS, подключенные к одной BS, работают на одном радиоканале, то необходим протокол, позволяющий согласовать работу всех передатчиков и приемников. При этом приложения должны получать доступ к радиоканалу таким образом, чтобы для каждого из них гарантированно обеспечивался заказанный уровень качества сервиса, называемого также в общепринятой англоязычной терминологии «QoS» – Quality of Service. В системе управления сетью WiMax качеством сервиса управляет подсистема, называемая планировщиком QoS (Stallings, 2013:129–334).

Стандарт IEEE 802.16 (IEEE, 2009: 54–59) описывает физический и канальный уровни модели взаимодействия открытых систем или OSI (Open System Interconnection). Планировщик QoS является одним из модулей подуровня MAC (MAC – англ. Media Access Control – подуровень управления доступом к среде передачи данных в модели взаимодействия открытых систем).

В связи с тем, что сети WiMAX изначально рассматривались как сети операторского класса, вопрос обеспечения QoS в них первичен. Стандарт IEEE 802.16 вопросы обеспечения требуемого качества обслуживания связывает с конкретным сервисным потоком. Сервисным потоком называется поток данных, связанный с определенным приложением. Каждый поток имеет свой QoS-класс обслуживания, при этом абоненту выделяется необходимая полоса пропускания — соответствующий виртуальный канал, которому присваивается 16-разрядный идентификатор соединения CID (Connection Identifier). Класс обслуживания QoS может задаваться для каждого абонентского терминала или назначаться для групп пользователей по MAC-, IP-адресам и др. Существует пять QoS-классов обслуживания (Ghosh, 2005: 129–136; Hoymann, 2005: 341–363; Park, 2007: 134–141; Stallings, 2014: 411–367; Ахмедов, 2012: 21–27; Sesia, 2009: 367–665):

класс доступа по первому требованию UGS (Unsolicited Grant Service), при котором абонентской станции немедленно предоставляется заранее оговоренная (при подключении к сети) фиксированная скорость передачи. Несмотря на применение коммутации пакетов, этот класс позволяет эмулировать непрерывный канал связи и, как при коммутации каналов, обеспечивает постоянную скорость передачи, что требуется, например, в традиционной телефонии;

класс доступа с переменной скоростью с передачей данных в режиме реального времени RT-VR (Real-Time Variable Rate), при котором абонентская станция передает информацию, чувствительную к задержкам, с

переменной скоростью без потери качества. Таким способом может передаваться видеoinформация с переменным сжатием;

класс доступа с переменной скоростью без передачи данных в режиме реального времени NRT-VR (Non-Real-Time Variable Rate) используется для передачи информации нечувствительной к задержкам, но требующей гарантированной скорости. Например, этот класс используется для передачи файлов (протоколы FTP, HTTP);

класс доступа в режиме максимально возможной в данный момент скорости BE (Best Effort) используется для передачи данных, не критичных к скорости передачи и времени задержки. Преимущественно данный класс используется для передачи данных в интернете;

для передачи данных приложений реального времени вводится промежуточный между UGS и RT-VT пятый расширенный класс доступа с переменной скоростью с передачей данных в режиме реального времени ERT-VR (Extended Real-Time Variable Rate), который обеспечивает постоянную скорость и задержку, например, при передаче голоса с подавлением пауз.

Инфраструктура QoS включает в себя следующие элементы:

службы с установлением соединения;

службы доставки: UGS, RT-VR, ERT-VR, NRT-VR;

модули обеспечения требуемых параметров QoS для каждого абонента отдельно;

модули управления доступом на основе политик разрешения;

службы создания статических или динамических сервисных потоков.

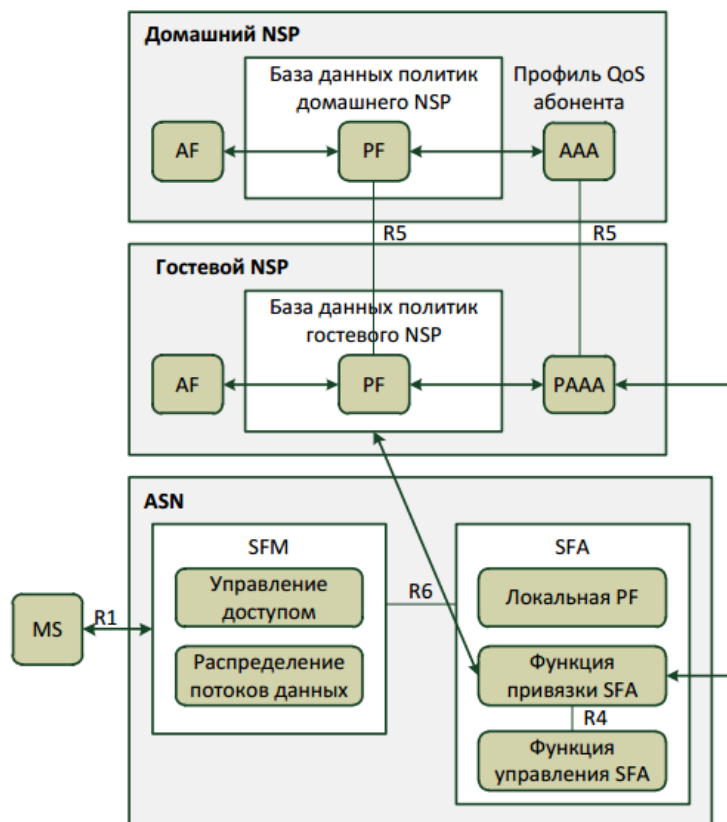


Рис. 1. Поддержка QoS в системах WiMAX

Вследствие того, что в стандарте IEEE 802.16 инфраструктура QoS поддерживается и в базовых сетях (а не только в БС и АС), для эффективного обслуживания абонентов с разными требованиями QoS в сети требуются дополнительные функциональные элементы: модули управления стратегиями работы (PF — Policy Function), управления доступом (AC — Admission Control), авторизации сервисных потоков (SFA — Service Flow Authorization). Модуль управления стратегиями работы вместе с соответствующими базами данных относится к NSP. Инфраструктура AAA функционирует совместно с модулями управления стратегиями работы для определения прав каждого пользователя на работу с определенными уровнями QoS и выстраивания соответствующих стратегий работы абонента. Модуль авторизации сервисных потоков обычно размещается в шлюзе ASN и использует информацию, полученную от модуля управления стратегиями работы в процессе подключения абонентов к сети и для управления сервисными потоками.

После того, как загружены профили QoS модуль авторизации сервисных потоков создает, принимает и приводит в действие заранее подготовленные сервисные потоки. Более того, в случае, когда пользовательский профиль QoS не удалось загрузить, модуль управления стратегиями работы может инициировать создание новых сервисных потоков, которые далее будут использоваться в качестве предварительно подготовленных.

Осуществим сети моделирование на базе WiMax стандарта и оценим параметры его качества, используя программный продукт OPNET Modeler 14.0 (Optimized Network Engineering Tools).

OPNET Modeler – мощная имитационная среда моделирования дискретных событий и состояний. Она множество включает библиотек технологий сетевых и протоколов связи, таких как TCP/IP, протокол передачи гипертекста (HTTP), технология асинхронного режима передачи (ATM) и FrameRelay, IP-QoS, 802.11 (Wi-Fi), ZigBee и др. Эти библиотеки блоки поставляют для построения моделей сетей. Одним из множества модулей, доступных в OPNET Modeler, является модуль беспроводной. Он функциональность расширяет среды для моделирования имитационного и анализа сетей беспроводных.

Для создания в среде OPNET Modeler 14.0 модели создать необходимо проект, ЛВС беспроводной с параметрами, представленными в таблице 1

Таблица 1 – Параметры беспроводной ЛВС

Initial Topology	Create empty scenario	Click Next
Network Scale	Office	Click Next
Size	100 m x 100 m	Click Next
Model Family	Wireless LAN	Click Next
Review check values		Click Finish

Получаем модель беспроводной ЛВС, которая состоит из следующих компонентов:

1 Ethernet-server;

1 базовой станции;

4 точек доступа.

Параметры моделируемой сети:

Диапазон частот - 5 МГц;

Высота антенны 1,5 м;

Модуляция 64QAM $\frac{3}{4}$;

Длина очереди 50 пакетов;

Продолжительность моделирования 100 с.

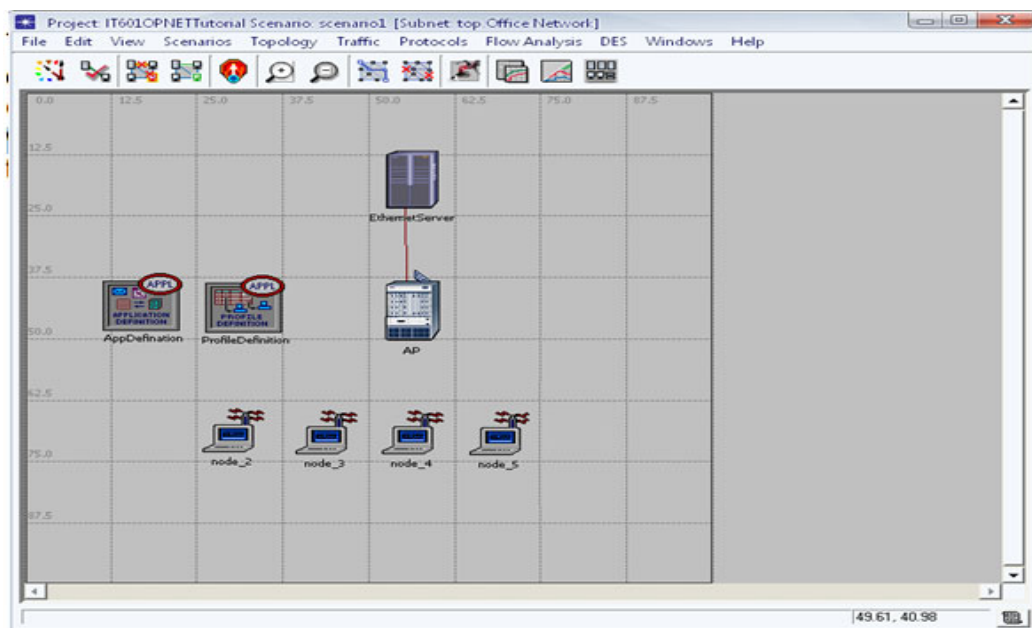


Рис. 2. Выбор типа модели

Осуществим настройку компонентов сети и зададим параметры Qos.

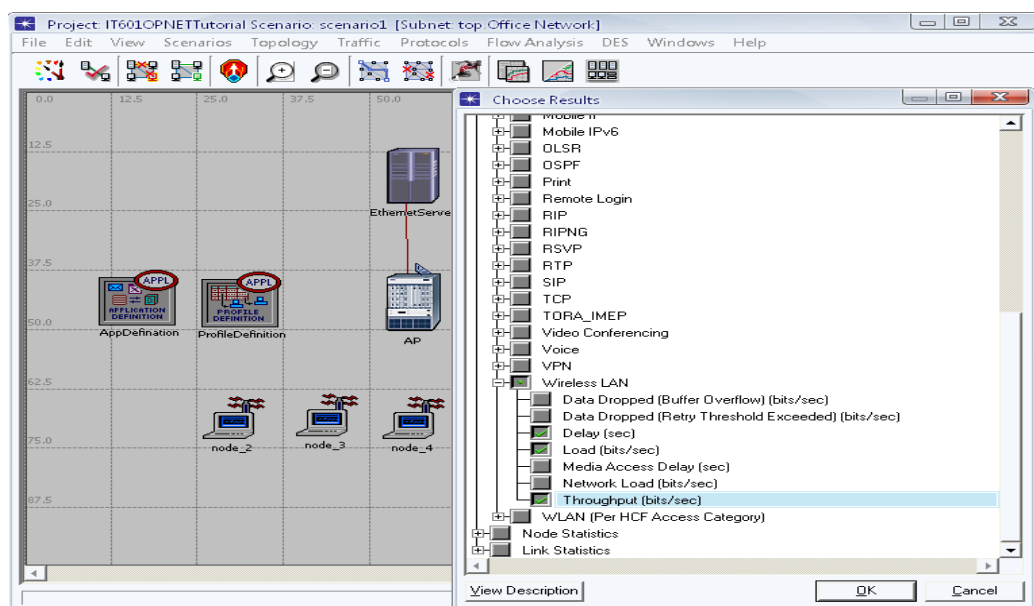


Рис. 3. Конфигурация параметров Qos

Протестирован сценарий, подключено 4 в котором хоста к одной БС, генерируют которые трафик и конкурируют за ресурсы в восходящем направлении. Каждый узел источника имеет трафик, эмулирующий трафик типа UGS (голос и видео), типа rtPS, и типа nrtPS трафик и BE трафик (Интернет).

Результаты пропускной способности различных классов трафика при генерации представлены на рисунке 4. Параметры для классов Qos, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры классов Qos

Класс Qos	Скорость передачи	Размер пакета, байт
BE	1Mbps	512 to 1024
UGS	1Mbps	300
rtPS	1Mbps	200 to 980
nrtPS	1Mbps	256 to 1024

Пропускная способность,
кбит/с

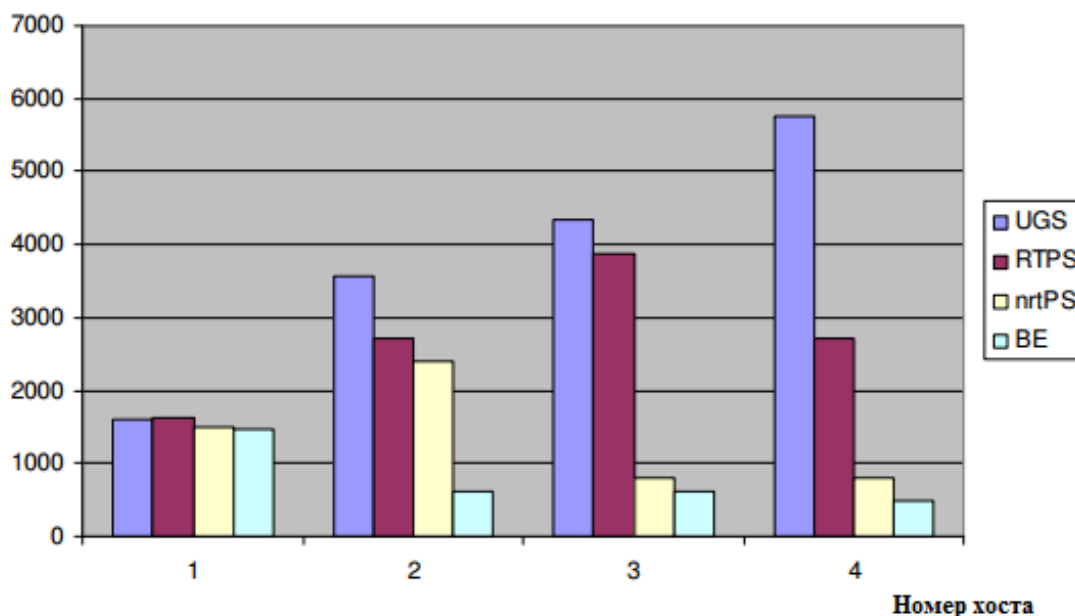


Рис. 4. Значения полосы пропускания для классов QoS

Полученные значения показывают, что трафик класса типа UGS имеет полосу пропускания наименьшую по сравнению с классом типа BE, который высокую полосу пропускания пакетов имеет. Таким образом, можно сказать, что пакеты типа UGS обслуживаться будут с более высоким качеством в отличие от типа BE пакетов.

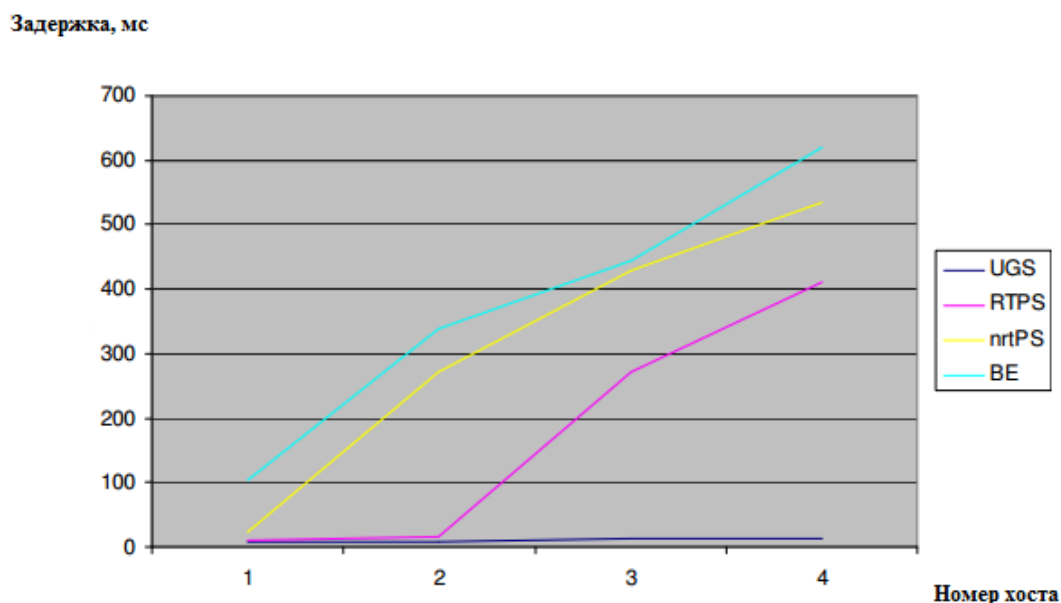


Рис. 5. Параметры задержки

Из графика видно, что с увеличением числа хостов, для каждого класса обслуживания пропускная способность увеличивается, следовательно, и задержка передачи пакетов увеличивается. Поскольку пропускная способность распределяется на все хосты при увеличении их количества, тем самым уменьшая пропускную способность для каждого из них и, следовательно, тем выше приоритет будет у трафика класса с точки зрения QoS.

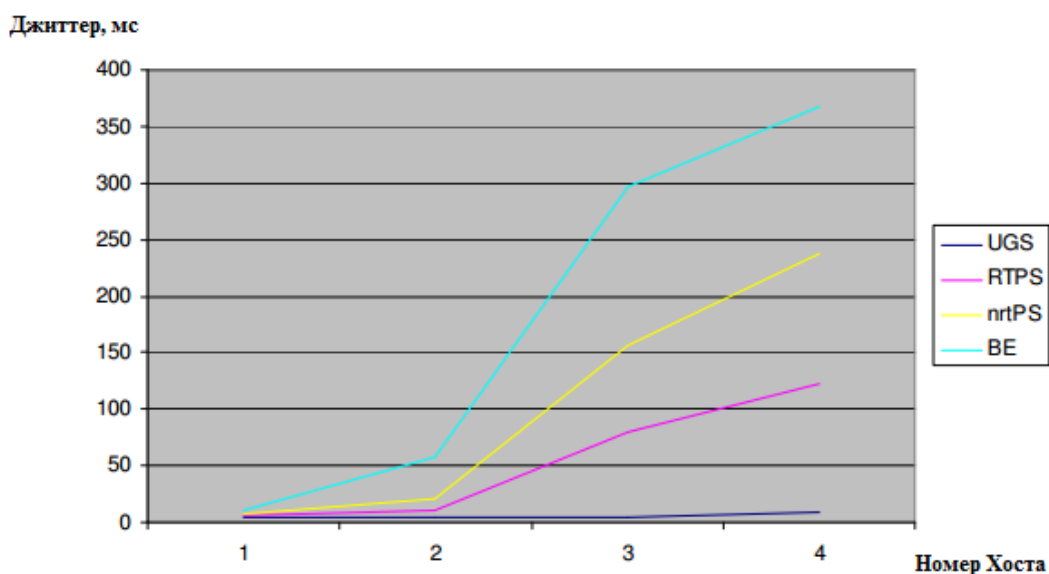


Рис. 6. Параметры джиттера

Анализируя полученные результаты с точки зрения задержки и джиттера, видно, что для класса трафика типа UGS, значения всегда поддерживаются в разумных и значительно низких значениях. Что касается остальных классов трафика, с увеличением числа абонентов, значение задержки и джиттера, как и ожидалось, существенно увеличились.

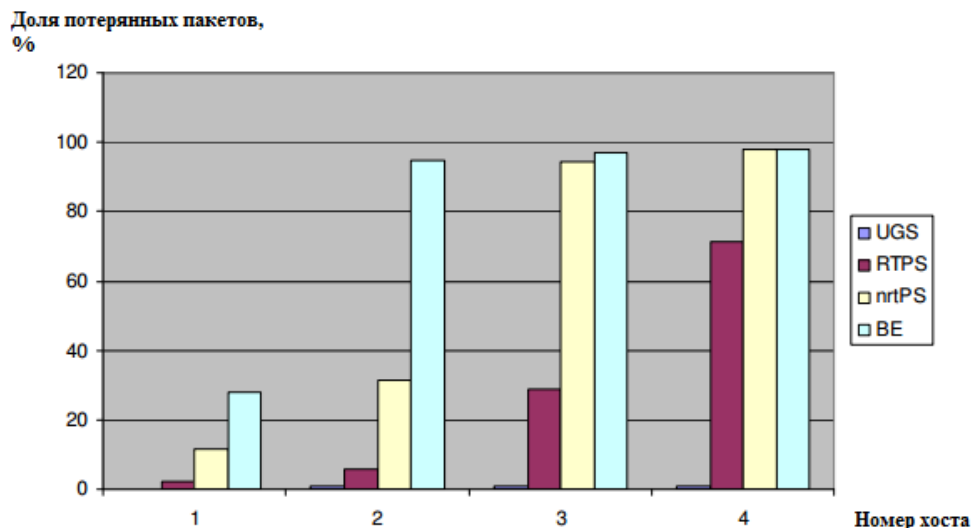


Рис. 7. Доля потерянных пакетов

Что касается результатов потери пакетов, то класс обслуживания типа UGS остается неизменным почти, тогда как остальные классы услуг имеют потери пакетов значительные, из-за алгоритмов приоритетизации. При моделировании ситуации с наличием 4 различных классов, увеличение параметров задержек и потери пакетов зависит от увеличения числа хостов.

Из полученных результатов, можно увидеть, что самый высокий класс качества QoS, нуждается в более высокой пропускной способности передачи и имеет более высокий процент потери пакетов.

Это объясняется тем фактом, что полоса пропускания будет распределяться между всеми хостами, а наиболее высший класс требует более высокой полосы пропускания (рисунок 8).

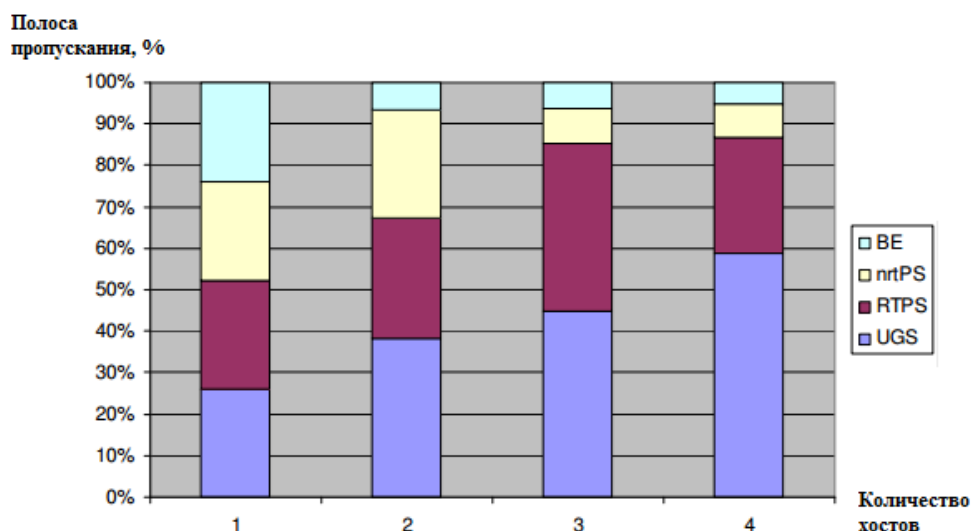


Рис. 8. Доля распределения полосы пропускания в зависимости от приоритета

Задачей планировщика разделение полосы радиоканала является между приложениями, работающими сетевыми в соответствии с заданными для каждого приложения параметрами качества связи. Разделение канала сводится к разделению кадров канального уровня, т.е. к формированию трафика.

Входными данными планировщика являются:

- 1) список сервисных потоков и QoS их параметры,
- 2) физические характеристики радиоканала,
- 3) размеры (заполненность) очередей пакетов.

Выходными данными являются карты типа UL-MAP и DL-MAP, описывают которые, данными каких сервисных потоков и в каком количестве заполнять восходящий и нисходящий подкадры соответственно.

Разрабатываемый планировщик располагается физически на базовой станции, поэтому полную информацию имеет об очередях данных, отправки ждущих от базовой к станциям абонентским (Downlink), но информации не имеет об данных очередях, на абонентских станциях расположенных (Uplink). Однако планировщик базовой станции распланировать должен как нисходящий подкадр, так и восходящий. Для этого в стандарте механизм предусмотрен запроса абонентскими станциями выделения полосы в восходящем подкадре – Bandwidth Request.

Планировщик QoS запускается перед отправкой очередного кадра.

В общем целом планировщика работу описать можно следующим образом:

- 1) получить актуальную информацию о радиоканале;
- 2) получить актуальную информацию о подключенных абонентских станциях;
- 3) получить актуальную информацию о существующих сервисных потоках;
- 4) получить информацию о текущем состоянии очередей данных (непосредственно, заполненность очередей для нисходящих потоков и запросы полосы для восходящих);
- 5) на основе полученных данных выполнить планирование кадра, выдав DL-MAP и UL-MAP.

В процессе работы над QoS планировщиком очевидной стала необходимость тестового окружения, разработки симулятора, исследовать позволяющего процессы управления качеством сервиса в условиях, к реальным приближенных.

Цель симулятора – моделирование полного замкнутого цикла взаимодействия базовой и абонентской станций по передаче данных с соблюдением качества сервиса, в WiMax стандарте.

Симулятор работу абстрагирует выше-и нижестоящих уровней (относительно модуля QoS), обеспечивая тестирования и отладки QoS алгоритмов без реализации полной всего стека компонентов.

К функциям симулятора относятся:

- задание параметров базовой станции;
- задание сервисных потоков и соединений массивом одного типа в статическом режиме, т.е. при инициализации базовой и абонентских станций;
- задание сервисных потоков и соединений массивом одного типа в динамическом режиме;
- задание карты модуляций для каждой станции SS в статическом и динамическом режимах;
- моделирование наполнения очередей для каждого соединения (абстрагирование пользовательских данных от вышестоящего уровня) на BS и SS;
- моделирование по радиointерфейсу отправки данных на BS и SS, т.е. моделирование работы драйвера физического уровня без учета фрагментации пакетов;
- моделирование по радиointерфейсу отправки данных на BS и SS с учетом фрагментации пакетов;
- формирование карт DL-MAP планировщиком QoS по запросу симулятора для каждого следующего фрейма, с учетом параметров QoS, карты модуляций и загруженности очередей;
- формирование карт UL-MAP планировщиком QoS по запросу симулятора для каждого следующего фрейма, с учетом параметров QoS, карты модуляций и запросов полосы (BR – bandwidth request) от абонентских станций;

моделирование запросов полосы — BR от абонентских станций на основе QoS параметров и загруженности очередей данных;

журнала событий ведение отдельных сущностей BS, SS и симулятора в целом;

верификация выдаваемых DL-MAP и UL-MAP на соответствие ограничениям (повторный контроль соблюдения условий и правил стандарта, параметров QoS, заполненности очередей и т. д.);

мониторинг производительности сети (пропускная способность в течение определенного времени, % использования канала).

Прототипы планировщика и симулятора на языке программирования C++ написаны с использованием STL библиотеки (Standard Template Library) и под управлением работают операционных систем семейства GNU/Linux.

Схема работы симулятора представлена на рисунке 9.

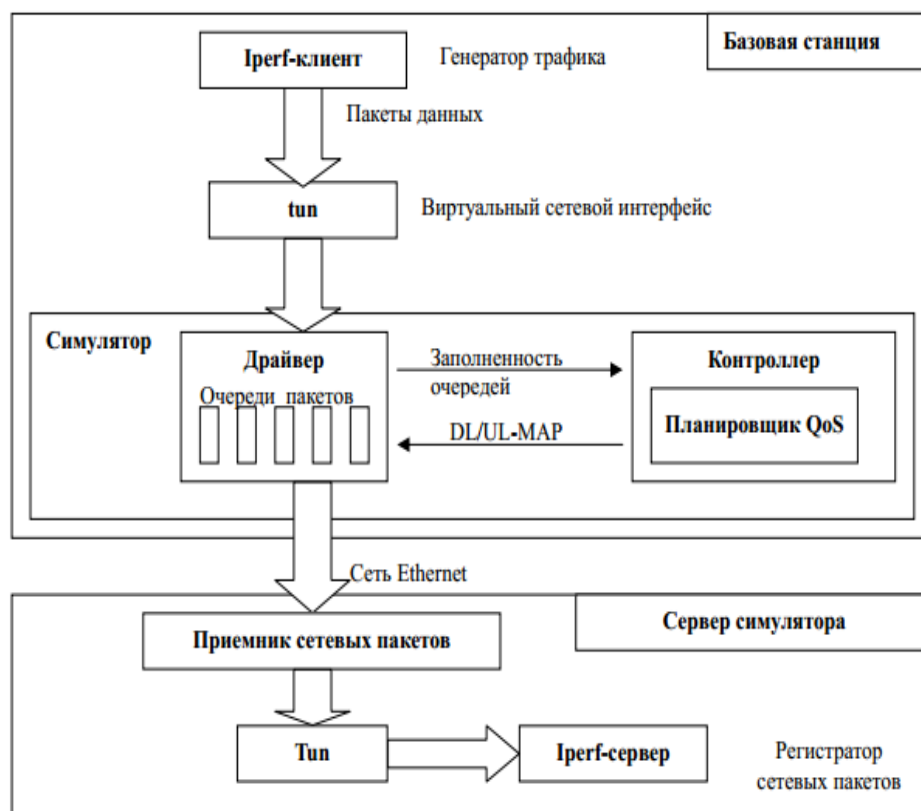


Рис. 9. Схема работы симулятора QoS

Симулятор использует в своей работе драйвер виртуальных сетевых устройств TUN/TAP.

Драйвер создать позволяет виртуальную карту сетевую и ее ассоциировать с определенным IP-адресом. Виртуальная карта сетевая так же работает, как реальная, с разницей той, что прикладному позволяет процессу в процесс отправки вмешиваться и получения сетевых пакетов. Фактически симулятор пакеты, отправляемые перехватывает генератором трафика (в принципе, любым сетевым приложением) через виртуальный интерфейс, и их обрабатывает согласно QoS алгоритмам.

В качестве генератора IP-трафика утилита iperf (<http://iperf.sourceforge.net/>) выступает. Выбор инструмента этого возможностью обусловлен задания параметров генерируемого трафика (полосы пропускания, размера пакета) на передающей стороне и, соответственно, измерения возможностью характеристик передаваемого трафика на

принимающей стороне (количество потерянных пакетов, задержка, флуктуация задержки и т.д.).

В работе возможность исследуется обеспечения качества сервиса в сетях беспроводных с использованием QoS планировщика eXtended Network Simulator (XNS), предназначенного для тестирования работы алгоритмов обеспечения качества сервиса. Исследуем сеть, состоящую из 1 базовой станции и компьютера.

Целевая аппаратная платформа: CPU Pentium 4 2ГГц, 1MB L2 cash, HDD 250Gb SATA, 2Gb RAM. Обмен данными по радиоканалу заменен обменом по сети Ethernet.

Задачей планировщика разделение полосы радиоканала является между работающими сетевыми приложениями в соответствии с заказанными для каждого приложения параметрами качества связи. Разделение канала к разделению кадров канального уровня сводится, т.е. к формированию трафика.

Входными данными планировщика являются:

- 1) список сервисных потоков и их QoS параметры,
- 2) физические характеристики радиоканала,
- 3) размеры (заполненность) очередей пакетов.

Выходными данными являются карты типа UL-MAP и DL-MAP, которые описывают, данными каких сервисных потоков и в каком количестве заполнять восходящий и нисходящий подкадры соответственно.

Разрабатываемый планировщик располагается физически на базовой станции, поэтому полную информацию имеет об очередях данных, отправки ждущих от базовой к абонентским станциям (Downlink), но информации об очередях данных не имеет, на абонентских станциях расположенных (Uplink). Однако должен планировщик базовой станции распланировать как нисходящий подкадр, так и восходящий. Для этого в стандарте механизм предусмотрен запроса абонентскими станциями выделения полосы в восходящем подкадре – Bandwidth Request.

Симулятор работу абстрагирует выше- и нижестоящих уровней (относительно модуля QoS), обеспечивая тестирования и отладки QoS алгоритмов без полной реализации стека всего компонентов.

Симулятор в работе своей драйвер виртуальных сетевых устройств TUN/TAP использует. Выбор виртуального сетевого интерфейса TUN/TAP продиктован основным требованием: продемонстрировать алгоритмов работу QoS обеспечения в условиях, приближенных к реальным, и измерить объективными средствами качество работы алгоритмов.

Использование виртуального сетевого интерфейса от необходимости избавляет создания сетевых драйверов (в терминах ОС Линукс) и тестировать позволяет работу алгоритмов QoS обеспечения на примере любых сетевых приложений, ориентированных на ТСР/IP стек.

В качестве IP-трафика генератора выступает утилита iperf. Выбор этого инструмента возможностью обусловлен задания параметров генерируемого трафика (полосы пропускания, размера пакета) на передающей стороне и, соответственно, возможностью характеристик измерения передаваемого трафика на принимающей стороне (количество потерянных пакетов, задержка, флуктуация задержки и т.д.).

На выходе формирует система файл отчета, пропускную способность сети отражающий при заданных параметрах нагрузки (см. таблицу 1).

В ходе тестирования число сервисных потоков менялось от 10 до 100, полоса каждого потока менялась в пределах от 1 до 600 Кбит/с (суммарно для 100 потоков – от 10 Кбит/с до 60 Мбит/с).

В качестве сетевого соединения использовалась сеть Gigabit Ethernet, пропускная способность которой – 1 Гбит/с – более чем на порядок превышает максимальную

пропускную способность беспроводной сети – 70 Мбит/с, поэтому потерь из-за перегрузки сети не наблюдалось.

Таблица 3 – Результаты тестирования симулятора QoS, % потерянных пакетов от общего числа переданных

Полоса пропускания каждого потока	Число потоков трафика (процессов iperf)										
	Кбит/с	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1		9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
200		0,08	0,08	0,08	0,24	0,16	0,16	0,24	0,08	0,08	0,24
400		0,04	0,04	0,08	0,16	0,12	0,12	0,24	0,1–40	0,1–40	2,8–9,5
600		0,027	0,11	0,11	0,21	0,16	24–45	45–55	27–40	22–39	15–77

На рисунке 10 представлена зависимость потерянных пакетов от общего числа переданных.

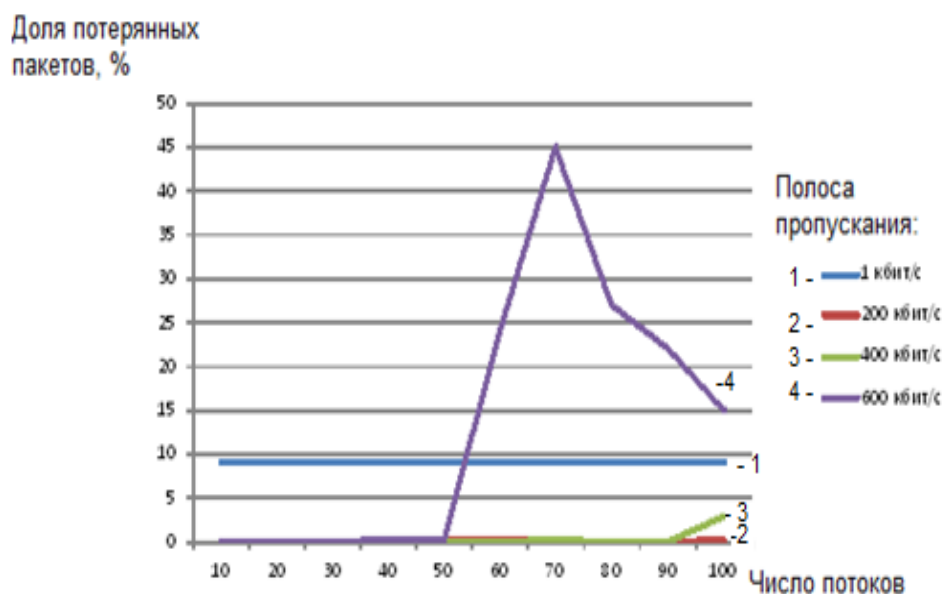


Рис. 10. Зависимость потерянных пакетов от общего числа переданных

Выбранная архитектура симулятора позволяет тестировать работу планировщика в условиях, приближенных к реальным. Из рисунка 10 видно, что при увеличении полосы пропускания уменьшается число потерянных пакетов. Пиковое значение потерянных пакетов при 600кбит/с говорит о том, что на каждом этапе потеря пакетов происходит из-за медленной обработки большого числа потоков, поступающих с сетевого уровня, от виртуального интерфейса Tun.

Заключение

В ходе проведенного исследования была поставлена цель — анализ архитектуры и механизмов обеспечения качества обслуживания в сетях стандарта WiMAX (IEEE 802.16), а также моделирование работы планировщика QoS с целью оценки эффективности распределения ресурсов в условиях многопользовательской нагрузки. Для достижения этой цели были применены комплексные методы исследования, включающие аналитический обзор нормативных и научных источников, систематизацию материалов, структурно-функциональный анализ, а также математическое и имитационное моделирование с использованием программного обеспечения OPNET Modeler 14.0 и собственного симулятора QoS на основе eXtended Network Simulator (XNS).

Применение аналитического метода позволило детально рассмотреть архитектуру сети WiMAX, включающую базовые станции (BS), абонентские станции (SS) и шлюзы доступа к сети Internet, а также определить ключевые элементы инфраструктуры QoS, такие как службы установления соединений, модули управления доступом и авторизации

сервисных потоков. Систематизация научной информации и материалов стандартов IEEE 802.16 позволила выделить пять классов обслуживания — UGS, RT-VR, NRT-VR, BE и ERT-VR, что обеспечивает возможность эффективного распределения полосы пропускания и минимизации задержек для приложений с различными требованиями к качеству связи.

Этап моделирования и тестирования подтвердил гипотезу исследования: использование встроенных механизмов QoS и планировщика ресурсов позволяет поддерживать заданный уровень обслуживания различных типов трафика даже при ограниченной полосе пропускания и изменяющихся условиях радиоканала. Результаты симуляций показали, что трафик класса UGS поддерживает минимальные значения задержки и джиттера при любом количестве подключенных абонентов, в то время как классы BE и NRT-VR демонстрируют увеличение задержек и потерь пакетов с ростом нагрузки. Анализ распределения полосы пропускания подтвердил, что приоритетные сервисные потоки получают достаточный ресурс для стабильной работы, а менее критичные приложения обрабатываются с задержкой, что соответствует алгоритмам приоритизации, определенным стандартом.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Цели исследования реализованы полностью. Исследованы архитектура и функциональные возможности сети WiMAX, определены механизмы обеспечения QoS, построены модели работы планировщика и симулятора, проведено тестирование с оценкой основных параметров качества обслуживания.

- Методы исследования доказали свою эффективность, так как аналитические, имитационные и математические подходы позволили получить количественные и качественные характеристики работы сети при различных сценариях нагрузки.

- Подтверждена выдвинутая гипотеза: управление ресурсами на основе классов QoS обеспечивает возможность гарантированного качества обслуживания для различных типов трафика, а применение планировщика QoS позволяет гибко распределять ресурсы радиоканала и снижать задержки критичных приложений.

- Научный вклад исследования заключается в систематизации и интеграции современных подходов к обеспечению QoS в сетях WiMAX, а также в разработке тестовой среды для проверки алгоритмов распределения ресурсов в условиях, приближенных к реальным.

Перспективы практического применения результатов работы включают:

- использование разработанных моделей и симуляторов для оптимизации сетей WiMAX в корпоративных и операторских средах;

- тестирование новых алгоритмов планирования QoS, включая динамическое распределение ресурсов и адаптацию к изменяющимся условиям радиоканала;

- интеграцию методов моделирования в учебные и исследовательские программы для подготовки специалистов по беспроводным сетям;

- применение предложенных подходов к управлению ресурсами в сетях следующего поколения, таких как LTE и 5G, с учётом опыта WiMAX.

Таким образом, проведённое исследование позволяет сделать вывод, что стандарты IEEE 802.16 и встроенные механизмы QoS обеспечивают эффективное управление качеством обслуживания в широкополосных беспроводных сетях. Полученные результаты подтверждают возможность практического внедрения предложенных моделей и методов в реальных сетевых инфраструктурах, а также открывают перспективы для дальнейших исследований, связанных с оптимизацией распределения ресурсов, снижением задержек и увеличением пропускной способности при обслуживании многопользовательских потоков. В дальнейшем планируется расширение исследования на сценарии с высокой мобильностью абонентов и интеграцию с современными стандартами передачи данных, что позволит повысить качество и стабильность беспроводной связи для широкого спектра приложений.

ЛИТЕРАТУРА

- IEEE, 2009 — IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. — IEEE Std 802.16-2009. — 2009. — P. 54–59. [Eng.]
- Andrews, 2007 — Andrews J., Ghosh A., Muhamed R. Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking. — Upper Saddle River: Prentice Hall, — 2007. — 447 p. [Eng.]
- Ahson, 2008 — Ahson S., Ilyas M. WiMAX Applications. — Boca Raton: CRC Press, — 2008. — 520 p. [Eng.]
- Stallings, 2013 — Stallings W. Wireless Communications & Networks. — 2nd ed. — Boston: Pearson Education, — 2013. — 640 p. [Eng.]
- Ghosh, 2005 — Ghosh A., Ratasuk R., Mondal B. Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential // IEEE Communications Magazine. — 2005. — Vol. 43. — No. 2. — P. 129–136. [Eng.]
- Hoymann, 2005 — Hoymann C. Analysis and Performance Evaluation of the OFDM-based Metropolitan Area Network IEEE 802.16 // Computer Networks. — 2005. — Vol. 49. — No. 3. — P. 341–363. [Eng.]
- Park, 2007 — Park S., Kim H. QoS Provisioning in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Networks // IEEE Communications Magazine. — 2007. — Vol. 45. — No. 6. — P. 134–141. [Eng.]
- Stallings, 2014 — Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoS, IoT, and Cloud. — Boston: Pearson Education, — 2014. — 560 p. [Eng.]
- Ахмедов, 2012 — Ахмедов А. А. Обеспечение качества обслуживания в беспроводных сетях WiMAX // Телекоммуникации. — 2012. — № 6. — С. 21–27. [Russ.]
- Sesia, 2009 — Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. — Chichester: Wiley, — 2009. — 744 p. [Eng.]

REFERENCES

- IEEE, 2009 – IEEE. (2009). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (IEEE Std 802.16-2009). — 2009. — P. 54–59. [in Eng.]
- Andrews, 2007 – Andrews, J., Ghosh, A., Muhamed, R. (2007). Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking. — Upper Saddle River: Prentice Hall. — 2007. — 447 p. [in Eng.]
- Ahson, 2008 – Ahson, S., Ilyas, M. (2008). WiMAX Applications. — Boca Raton: CRC Press. — 2008. — 520 p. [in Eng.]
- Stallings, 2013 – Stallings, W. (2013). Wireless Communications & Networks. 2nd ed. — Boston: Pearson Education. — 2013. — 640 p. [in Eng.]
- Ghosh, 2005 – Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B. (2005). Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential. IEEE Communications Magazine. — 2005. — 43(2). — Pp. 129–136. [in Eng.]
- Hoymann, 2005 – Hoymann, C. (2005). Analysis and Performance Evaluation of the OFDM-based Metropolitan Area Network IEEE 802.16. Computer Networks. — 2005. — 49(3). — Pp. 341–363. [in Eng.]
- Park, 2007 – Park, S., Kim, H. (2007). QoS Provisioning in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Networks. IEEE Communications Magazine. — 2007. — 45(6). — Pp. 134–141. [in Eng.]
- Stallings, 2014 — Stallings, W. (2014). Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoS, IoT, and Cloud. — Boston: Pearson Education. — 2014. — 560 p. [in Eng.]
- Akhmedov, 2012 — Akhmedov, A. A. (2012). Obespechenie kachestva obsluzhivaniya v besprovodnykh setyakh WiMAX[Quality of service provisioning in WiMAX wireless networks]. Telekommunikatsii. — 2012. — No. 6. — Pp. 21–27. [in Russ.]
- Sesia, 2009 — Sesia, S., Toufik, I., Baker, M. (2009). LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. — Chichester: Wiley. — 2009. — 744 p. [in Eng.]